П.Г.ТАЛАЛАЙ
Санкт-Петербургский горный институт,
Россия

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА ПРИ ВРАЩАТЕЛЬНОМ БУРЕНИИ

В последние годы механическое вращательное бурение льда стало основным видом сооружения глубоких скважин во льдах Антарктического и Гренландского ледникового покровов. В этих регионах продолжаются работы по изучению палеоклимата Земли, динамики и состава ледяных щитов, влияния антропогенного загрязнения на климатические изменения и решение других естественно-научных задач. В результате реализации различных национальных и международных проектов вращательным способом пройдены глубокие скважины в Антарктиде на Куполе F (2503 м, 1996 г.), станции Восток (3623 м, 1998 г.), Куполе С (1458 м, 2001) и в Гренландии на базе NGRIP (1371 м, 1997 г.; 2931 м, 2000 г.).

Бурение верхних холодных интервалов ледниковых покровов Антарктиды и Гренландии отличается, как правило, хорошей стабильностью и высокими средними скоростями проходки (до 35 м/сутки). Однако с увеличением глубины производительность бурения заметно снижается, что связано не только с повышением затрат времени на спускоподъемные операции, но и со снижением рейсовой проходки. На больших глубинах из-за резкого изменения реологических свойств льда, прежде всего повышения его температуры, при бурении происходит зашламование породоразрушающего инструмента, зачастую не дающее вести проходку глубже 1-1,5 м вместо обычных 3-3,5 м.

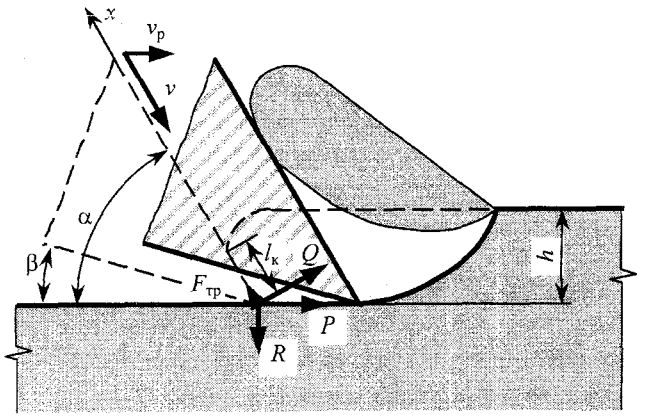


Рис.1. Схема процесса разрушения льда резанием

Одной из причин образования сальников в призабойной зоне является протаивание льда при его разрушении и налипание на буровой инструмент. Это осложнение возможно предупредить путем поддержания таких параметров разрушения, которые не вызывают нарушения естественного агрегатного состояния проходимой ледяной толщи и шлама.

Если определению усилий, возникающих на резце при разрушении льда, посвящен ряд исследований [11, 12 и др.], то влияние теплового фактора на процесс разрушения является практически неизученным. Целью настоящей статьи является аналитическая оценка удельных тепловых потоков, возникающих на забое скважины при вращательном бурении льда.

Характер механического разрушения льда определяется в основном скоростью нагружения и температурой льда. Установлено, что при умеренно низких температурах (ниже минус 5 °С) переход от хрупкого разрушения льда к пластическому деформированию происходит при увеличении скорости деформации в диапазоне 10^{-4}–10^{-2} $с^{-1}$ [4]. Разрушение льда при вращательном бурении характеризуется значительно более высокими скоростями нагружения.

При вращательном бурении скважин во льду основным видом разрушения является резание, под которым понимается процесс периодического отделения элементов массива прижатым к забою породоразрушающим инструментом (резцами) при его движении. Резание хрупких материалов носит характер периодического скола (рис.1). Резец, продвигаясь в направлении пути резания, внедряется в массив и уплотняет его. У кромки резца возникает концентрация напряжений, которые при достижении предельных значений вызывают образование и развитие трещины [5].

Для описания процесса резания и теплообменных процессов принимаем, что:

– плоскость забоя является горизонтальной и резание при вращении породоразрушающего инструмента аппроксимируется резанием путем строгания;

– основным источником зоны резания является теплота трения;

– вся работа сил трения переходит в тепло, которое выделяется по контактной площадке резца с отделяемым элементом;

– теплота, выделяемая при деформировании отделяемого элемента и развитии трещины, пренебрежимо мала;

– теплообменные процессы в контактной зоне под резцом в связи с их незначительной ролью в общем балансе тепла не рассматриваются;

– интенсивность выделения тепла не изменяется по ширине контактной зоны;

– теплофизические свойства резца и льда в зоне резания остаются постоянными.

В общем случае в результате перехода работы по преодолению сил трения в тепло в части контактной зоны между отделяемым элементом и резцом будет происходить плавление льда, в другой части лишь его нагревание без изменения агрегатного состояния. При этом будет справедлива система уравнений

$$\begin{cases} q_1 = q_2 + q_3 + q_4 + q_5; \\ q_6 = q_2' + q_5, \end{cases} \qquad (1)$$

где q_1 – удельный тепловой поток, образующийся вследствие перехода работы по преодолению сил трения в тепло, Вт/м^2; q_2 и q_3 – удельные тепловые потоки, образующиеся при создании температурного поля соответственно в отделяемом элементе и в резце, Вт/м^2; q_4 и q_5 – удельные

тепловые потоки, расходуемые соответственно на плавление льда и нагрев водяной прослойки между передней гранью резца и льдом, Вт/м^2; q_6 – удельный тепловой поток, проходящий через водяную прослойку, Вт/м^2; q_2' – часть теплового потока q_2, образующегося в зоне плавления, Вт/м^2.

Принимая линейную аппроксимацию функции силы трения от перемещения передней поверхности резца относительно определяемого элемента, получим, что [7]

$$q_1 = F_{тр} v(l_к - x)/bl_к^2,$$

где $F_{тр}$ – сила трения, Н; v – скорость перемещения передней поверхности резца, м/с; $l_к$ – длина контакта резца с определяемым элементом, м; b – ширина резца, м.

Тепловыделение на площадке контакта передней грани резца с отделяемым элементом имитируем плоским подвижным источником переменной интенсивности. При расчете используем теорию быстродвижущихся источников тепла [8]. Под быстродвижущимся источником тепла понимается источник, скорость перемещения которого превышает скорость распространения тепла. Для этого случая в точках тела, расположенных впереди источника, температура не изменяется.

На площадке контакта температурное поле, возникающее под действием быстродвижущегося источника тепла переменной интенсивности в подвижной системе координат, описывается выражением [7]

$$\Delta t = \frac{q(x_i)}{\lambda}\sqrt{\frac{a}{\pi v(x - x_i)}},$$

где $q(x_i)$ – удельный тепловой поток, Вт/м^2; x_i – абсцисса линейных источников тепла, образующих плоский источник, $0 \le x_i \le x$, м; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); a – коэффициент температуропроводности, м^2/с.

Повышение температуры под действием всех линейных источников при равномерном распределении удельного теплового потока по передней грани резца получим интегрированием:

$$t = \frac{q}{\lambda l_к}\sqrt{\frac{a}{\pi v}}\int_0^x \frac{l_к - x_i}{\sqrt{x - x_i}}dx_i = \frac{4q}{3\lambda l_к}\sqrt{\frac{ax}{\pi v}}(1{,}5l_к - x). \qquad (2)$$

Перепишем выражение (2) относительно q:

$$q = \frac{3t\lambda l_к}{4(1{,}5l_к - x)}\sqrt{\frac{\pi v}{ax}}. \qquad (3)$$

Удельные тепловые потоки q_2, q_2' и q_3 определяются из соотношения (2):

$$q_2 = \frac{3t'\lambda_л l_к}{4(1{,}5l_к - x)}\sqrt{\frac{\pi v}{a_л x}};\quad q_2' = \frac{3t'\lambda_л l_к'}{4(1{,}5l_к' - x)}\sqrt{\frac{\pi v}{a_л x}};\quad q_3 = \frac{3t''\lambda_р l_к}{4(1{,}5l_к - x)}\sqrt{\frac{\pi v}{a_р x}},$$

где $\lambda_л$ и $\lambda_р$ – коэффициенты теплопроводности соответственно льда и резца, Вт/(м·°С); $a_л$ и $a_р$ – коэффициенты температуропроводности соответственно льда и материала резца, м^2/с; t' – повышение температуры на поверхности льда, $t' = t_1 - t_л$, °С; t'' – повышение температуры на передней грани резца, $t'' = t_2 - t_р$, °С; t_1 и t_2 – температура на поверхности соответственно льда и передней грани резца, °С; $t_л$ и $t_р$ – температура соответственно льда и резца перед их взаимодействием, °С; $l_к'$ – длина зоны плавления, м.

В соответствии с основными понятиями и законами калориметрии и теплопередачи имеем

$$q_4 = \frac{\psi_л \rho_л \delta v}{l_к};\quad q_5 = \frac{c_в \rho_в \delta v t_{ср}}{l_к};\quad q_6 = \frac{\lambda_в}{\delta}(t_2 - t_1),$$

где $\psi_л$ – удельная теплота плавления льда, Дж/кг; $\rho_л$ – плотность льда, кг/м^3; δ – толщина образующейся водяной прослойки, м; $c_в$ – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°С); $\rho_в$ – плотность воды, кг/м^3; $t_{ср}$ – средняя температура воды в прослойке, при прямолинейном распределении температуры $t_{ср} = t_1 + t_2/2$, °С; $\lambda_в$ – коэффициент теплопроводности водяной прослойки, Вт/(м·°С).

Температуру резца можно выразить как $t_р = k_н t_л$, где $k_н$ – коэффициент, учитывающий нагрев резца во времени (в первоначальный момент $k_н = 1$).

Для первого уравнения системы (1) справедливо неравенство $t_1 \le 0$, для второго $t_1 = t_{агр} = 0$ °С. Учитывая вышеизложенное, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{F_{тр} v (l_к - x)}{b l_к^2} = \dfrac{3(t_1 - t_л)\lambda_л l_к}{4(1{,}5 l_к - x)} \sqrt{\dfrac{\pi v}{a_л x}} + \dfrac{3(t_2 - k_н t_л)\lambda_р l_к}{4(1{,}5 l_к - x)} \sqrt{\dfrac{\pi v}{a_р x}} + \dfrac{\psi_л \rho_л \delta v}{l_к} + \dfrac{c_в \rho_в \delta v (t_1 + t_2)}{2 l_к}; \\ \dfrac{\lambda_в t_2}{\delta} = -\dfrac{3 t_л \lambda_л l_к'}{4(1{,}5 l_к' - x)} \sqrt{\dfrac{\pi v}{a_л x}} + \dfrac{c_в \rho_в \delta v t_2}{2 l_к}. \end{cases}$$

В граничных условиях теплообмена между резцом и отдельным элементом льда возможны два режима. В первом выделяющегося тепла недостаточно для плавления льда ($t_1 = t_2$; $\delta = 0$; $l_к' = 0$), во втором – плавление льда происходит по всей длине контактной зоны ($t_1 = 0$; $l_к' = l_к$).

Для первого варианта распределение температуры льда в контактной зоне можно найти из следующего выражения:

$$t_1 = \frac{0{,}752 F_{тр}(l_к - x)(1{,}5 l_к - x)\sqrt{x v a_л a_р}}{b l_к^3 \left(\lambda_л \sqrt{a_р} + \lambda_р \sqrt{a_л}\right)} + \frac{t_л \left(\lambda_л \sqrt{a_р} + k_н \lambda_р \sqrt{a_л}\right)}{\lambda_л \sqrt{a_р} + \lambda_р \sqrt{a_л}}.$$

Во избежание агрегатного перехода лед – вода должно соблюдаться условие $t_1 < 0$. Тогда получим, что сила трения, при которой не происходит плавление льда, определяется следующим неравенством:

$$F_{тр} < -\frac{1{,}33 t_л b l_к^3 \left(\lambda_л \sqrt{a_р} + k_н \lambda_р \sqrt{a_л}\right)}{(l_к - x)(1{,}5 l_к - x)\sqrt{x v a_л a_р}}. \qquad (4)$$

Для области определения $0 \le x \le l_к$ выражение, стоящее в правой части неравенства (4), имеет единственный экстремум в точке с абсциссой $x = 0{,}24 l_к$. Для этой точки

$$F_{тр} < -\frac{2{,}62 t_л b \sqrt{l_к} \left(\lambda_л \sqrt{a_р} + k_н \lambda_р \sqrt{a_л}\right)}{\sqrt{v a_л a_р}}. \qquad (5)$$

В работе [10] аналитически определена сила резания P в момент инициирования трещины:

$$P = \frac{b h \sin\alpha \cos\varphi}{1 - \sin(\alpha + \varphi)} \sqrt{\frac{2 E \gamma_э}{\pi k_а d_{кр}}}, \qquad (6)$$

где h – глубина резания, м; α – угол резания, град.; φ – угол трения материала резца по льду, град.; E – модуль упругости льда, Н/м^2; $\gamma_э$ – удельная поверхностная энергия льда, Дж/м^2; $k_а$ – коэффициент, учитывающий анизотропные свойства льда (для поликристаллического льда $k_а = 1$); $d_{кр}$ – средний диаметр кристаллов льда, м.

Приведем неравенство (5) в удобную для анализа форму, используя формулу (6), а также следующие соотношения:

$$Q=\frac{P}{\sin\alpha};\quad F_{тр}=Q\operatorname{tg}\varphi;\quad l_к=\frac{k_{выс}h}{\sin\alpha};\quad v=\frac{v_р}{\cos\alpha},$$

где Q – сила, действующая перпендикулярно передней грани резца, Н; $k_{выс}$ – коэффициент, отражающий отношение высоты контакта резца с массивом к глубине резания; $v_р$ – скорость резания, м/с.

Тогда получим следующее неравенство для определения параметров режима бурения, при которых не происходит плавления отделяемого элемента льда в контактной зоне:

$$\frac{\sin\varphi}{1-\sin(\alpha+\varphi)}\sqrt{\frac{2E\gamma_э h}{\pi k_а d_{кр}}}+\frac{2{,}62t_л\sqrt{k_{выс}}\left(\lambda_л\sqrt{a_р}+k_н\lambda_р\sqrt{a_л}\right)}{\sqrt{v_р a_л a_р\operatorname{tg}\alpha}}<0. \qquad (7)$$

Используя неравенство (7), можно определить и в случае необходимости снизить тепловые потоки, возникающие в процессе разрушения льда на забое скважины, путем изменения формы и размеров резца, эффективным охлаждением породоразрушающего инструмента, изменением теплофизических свойств резца.

По формуле (7) для различных значений угла резания и температуры льда рассчитаны критериальные кривые, связывающие скорость и глубину резания (рис.2). При этом принимались следующие значения постоянных и коэффициентов: $\lambda_л = 2{,}22$ Вт/(м·°С); $a_л = 1{,}14\cdot10^{-6}$ м^2/с [6]; $\lambda_р = 45{,}4$ Вт/(м·°С); $a_р = 1{,}26\cdot10^{-5}$ м^2/с [1]; $\varphi = 5{,}2°$ [9]; $k_н = 1$; $k_{выс} = 1$; $E = 9{,}7\cdot10^9$ Па [3]; $\gamma_э = 1{,}47$ Дж/м^2 [2]; $d_{кр} = 0{,}003$ м.

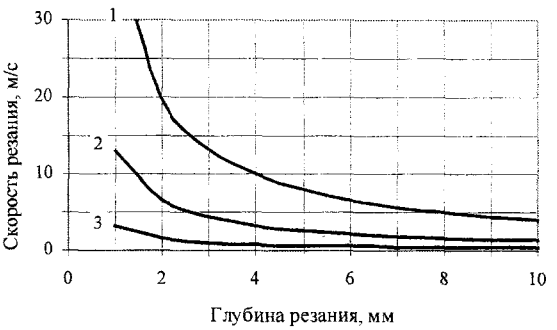


Рис.2. Предельная скорость резания, при которой происходит плавление отделяемого элемента льда
1 – $\alpha = 45°$; $t_л = -5$ °С; 2 – $\alpha = 60°$; $t_л = -10$ °С;
3 – $\alpha = 60°$; $t_л = -5$ °С

В областях, лежащих выше этих кривых, происходит плавление льда при его разрушении, поэтому выбор скорости резания для заданных глубины резания и температуры разбуриваемого льда должен осуществляться из соответствующего диапазона.

Следует отметить, что при расчетах коэффициент, учитывающий нагрев резца во времени, принимался равным единице, т.е. предполагалось, что резец мгновенно охлаждается очистным агентом. Это положение будет оправданным при бурении с очисткой забоя охлажденной жидкостью. Однако при бурении с очисткой шнековым транспортером или продувкой часть тепла, поступающего в резец, будет аккумулироваться в нем и идти на увеличение его температуры. Для этих условий необходимо проведение дополнительных исследований по уточнению значений коэффициента при различных способах очистки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Беляев Н.М.* Сопротивление материалов. 15-е изд., перераб. М.: Наука, 1976. 607 с.
2. *Гудмен Д.* Измерение критического коэффициента напряжений поликристаллического льда при больших скоростях нагружений // Физика и механика льда. М.: Мир, 1983. С. 127-139.
3. *Епифанов В.П.* Механика деформируемого льда / ВИНИТИ. М., 1991. 200 с. (Итоги науки и техники ВИНИТИ. Сер. «Гляциология». Т.8).
4. *Епифанов В.П.* Механика разрушения льда в зависимости от температуры и скорости нагружения // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1984. № 2. С. 188-196.
5. *Зеленин А.Н.* Основы разрушения грунтов. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1968. 376 с.
6. *Пехович А.И.* Основы гидроледотермики. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 200 с.
7. *Резников А.Н.* Теплообмен при резании и охлаждении инструментов. М.: Машгиз, 1963. 200 с.
8. *Резников А.Н.* Теплофизика резания. М.: Машиностроение, 1969. 288 с.
9. *Рывлин А.Я.* Экспериментальное изучение трения льда // Труды ААНИИ. 1973. Т.309. С. 186-199.

10. *Талалай П.Г.* О разрушении льда при вращательном бурении // Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые. Вып.16: Межвуз. науч. темат. сборник. Екатеринбург: Изд-во УГИ, 1993. С. 91-97.

11. *Ueda H.T.* Experiments on the cutting process in ice: USA CRREL Spec. Rep. 89-5/H.T.Ueda, J.Kalafut. Hanover: USA CRREL, 1989. 40 p.

12. *Vasiliev N.I.* Investigation of the ice cutting process by the rotary drill/N.I.Vasiliev, P.G.Talalay // Memoirs of National Institute of Polar Research (Japan). 1994. Spec. Issue № 49. P. 132-137.